

## Физическая электроника

Научная статья

УДК 621.385.6

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15310>

### МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПОТОКА В ГИРОТРОНЕ С УЧЕТОМ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ КАТОДА И ТЕПЛОВЫХ ЭФФЕКТОВ В ЭЛЕКТРОННОЙ ПУШКЕ

**О. И. Лукша** <sup>✉</sup>, **П. А. Трофимов**, **А. Г. Малкин**

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,

Санкт-Петербург, Россия

<sup>✉</sup> [louksha@rphf.spbstu.ru](mailto:louksha@rphf.spbstu.ru)

**Аннотация.** Выполнен трехмерный траекторный анализ в электронно-оптической системе гиротрона с частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью примерно 100 кВт, с учетом шероховатости поверхности термоэмиссионного катода и тепловых эффектов, вызванных его нагревом. Для учета шероховатостей поверхности катода микронного размера использован новый подход, основанный на использовании стандартных инструментов, доступных в программе трехмерного моделирования при задании параметров термоэлектронной эмиссии. Сопоставление расчетных данных с экспериментальными позволило уточнить закономерности влияния разброса начальных скоростей и изменения геометрии катодного узла при его нагреве на параметры электронного потока, формируемого в электронно-оптической системе гиротрона.

**Ключевые слова:** СВЧ электроника, гиротрон, винтовой электронный поток, катод, шероховатость поверхности, нагрев

**Финансирование:** Исследование выполнено при финансовой поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 22-29-00136). Часть результатов была получена с использованием вычислительных ресурсов суперкомпьютерного центра СПбПУ (<http://www.scc.spbstu.ru>).

**Для цитирования:** Лукша О. И., Трофимов П. А., Малкин А. Г. Моделирование электронного потока в гиротроне с учетом шероховатости поверхности катода и тепловых эффектов в электронной пушке // Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки. 2022. Т. 15. № 3. С. 132–142. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15310>

Статья открытого доступа, распространяемая по лицензии CC BY-NC 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Original article

DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15310>

### SIMULATION OF AN ELECTRON BEAM IN A GYROTRON TAKING INTO ACCOUNT THE CATHODE SURFACE ROUGHNESS AND THERMAL EFFECTS IN THE ELECTRON GUN

**O. I. Louksha** <sup>✉</sup>, **P. A. Trofimov**, **A. G. Malkin**

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg, Russia

<sup>✉</sup> [louksha@rphf.spbstu.ru](mailto:louksha@rphf.spbstu.ru)

**Abstract.** In the paper, a 3D trajectory analysis taking into account the surface roughness



of the thermionic cathode and thermal effects caused by its heating has been performed in the electron-optical system of a gyrotron with a frequency of 74,2 GHz and an output power of approximately 100 kW. A new approach based on the use of standard settings available in the 3D simulation software when the model parameters of thermionic emission being given, was used for consideration of the micron-sized cathode surface roughness. A comparison between the calculated and experimental data made it possible to clarify the regularities of the influence of the initial velocity spread and the change of geometry of the cathode assembly caused by its heating on the parameters of the electron beam formed in the electron-optical gyrotron system.

**Keywords:** microwave electronics, gyrotron, helical electron beam, cathode, surface roughness, heating

**Funding:** The reported study was funded by Russian Science Foundation (Grant No. 22-29-00136). The results were obtained using the computing resources of the Supercomputer Center of the Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (<http://www.scc.spbstu.ru>).

**For citation:** Louksha O. I., Trofimov P. A., Malkin A. G., Simulation of an electron beam in a gyrotron taking into account the cathode surface roughness and thermal effects in the electron gun, St. Petersburg State Polytechnical University Journal. Physics and Mathematics. 15 (3) (2022) 132–142. DOI: <https://doi.org/10.18721/JPM.15310>

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

## Введение

Гиротроны сегодня занимают лидирующее положение среди источников мощного СВЧ-излучения в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах длин волн. Они используются, в частности, для нагрева высокотемпературной плазмы и управления током в установках управляемого термоядерного синтеза, где требуются гиротроны мегаваттного уровня выходной мощности, работающие в непрерывном и длинноимпульсном режимах [1 – 3]. Эффективность работы этих приборов и их предельные достижимые параметры зависят от качества винтового электронного потока (ВЭП), поступающего в резонатор. Параметры ВЭП определяются на этапе разработки гиротрона в результате численного траекторного анализа в электронно-оптической системе (ЭОС), наиболее распространенным вариантом которой в настоящее время является адиабатическая система, включающая магнетронно-инжекторную пушку (МИП) с термокатодом и область магнитной компрессии [3, 4].

Высококачественный ВЭП характеризуется большим значением среднего питч-фактора  $\alpha = v_{\perp}/v_{\parallel}$  ( $v_{\perp}$ ,  $v_{\parallel}$  – поперечная и продольная скорости электронов), малым скоростным ( $\delta v_{\perp}$ ) и энергетическим ( $\delta \epsilon$ ) разбросами, требуемой пространственной структурой, отсутствием паразитных колебаний пространственного заряда (см., например, монографию [4]). Один из важных факторов, приводящих к ухудшению качества ВЭП, связан с шероховатостью поверхности катода, типичный размер неоднородностей на которой составляет единицы-десятки микрон [4 – 11]. Возникают трудности при проведении трехмерного траекторного анализа в системе с катодом, на поверхности которого имеются неоднородности подобного размера. При типичной длине ЭОС гиротрона, составляющей сотни миллиметров, наличие такого катода приводит к огромному числу ячеек сетки, что не приемлемо для современных вычислительных систем. Разработаны алгоритмы, которые позволяют косвенно учесть шероховатость эмитирующей поверхности в модели ЭОС с гладким катодом путем задания начальной скорости каждой частицы, стартующей с катода [10, 11]. Эти алгоритмы основываются на использовании данных предварительных расчетов, отдельно выполняемых для каждого конкретного гиротрона.

Чтобы избежать несоответствия теоретических и экспериментальных значений параметров ВЭП, зачастую наблюдаемого на практике, при проведении траекторного анализа следует учитывать возможное изменение геометрии МИП, вызванное нагревом термокатаода. Проблема учета тепловых эффектов в электронной пушке также индивидуальна для каждого конкретного прибора с характерными для него размерами элементов ЭОС.

В настоящей работе применяется более простой, по сравнению с представленными в статьях [10, 11], способ учета шероховатости катода при расчете траекторий электронов в ЭОС гиротронов. Он основан на использовании средств программного пакета CST Studio Suite [12], которые доступны в нем при задании параметров термоэлектронной эмиссии. Данный пакет использовался для проведения всех расчетов, описанных в работе. В результате этих расчетов были определены характеристики ВЭП в ЭОС гиротрона Санкт-Петербургского политехнического университета (СПбПУ) с рабочей частотой 74,2 ГГц и выходной мощностью  $\sim 100$  кВт [13 – 16], а также влияние на эти характеристики шероховатости поверхности эмиттера и эффектов, вызванных его нагревом.

### Модель катода с шероховатой поверхностью и влияние шероховатости на параметры ВЭП

Электроны, эмитируемые с катода МИП, приобретают начальную поперечную скорость под действием скрещенных электрического и магнитного полей. Если следовать адиабатической теории МИП (см., например, работы [4, 5]), то поперечная скорость электрона вблизи катода выражается как

$$v_{\perp c} = \overline{v_{\perp c}} \pm v_0, \quad (1)$$

где  $\overline{v_{\perp c}} = E_{\perp c} / B_c$  – средняя поперечная скорость на катоде ( $E_{\perp c}$  – компонента электрического поля у катода, перпендикулярная магнитному полю,  $B_c$  – индукция магнитного поля у катода),  $v_0$  – модуль начальной скорости в направлении, перпендикулярном магнитному полю (совпадает с азимутальным направлением для аксиально-симметричной ЭОС гиротрона).

При шероховатой поверхности катода электроны приобретают начальные скорости под действием микрополей вблизи локальных неоднородностей на этой поверхности. Как следствие, возникает разброс начальных поперечных скоростей электронов на катоде:

$$\delta v_{\perp c} = \frac{\Delta v_0}{v_{\perp c}}, \quad (2)$$

где  $\Delta v_0$  – абсолютный разброс начальных скоростей.

Кроме шероховатости, фактором, приводящим к увеличению  $\delta v_{\perp c}$ , является разброс начальных тепловых скоростей электронов, эмитируемых с поверхности катода. Важно, что величина относительного разброса поперечных скоростей, с учетом всех факторов этого разброса, остается неизменной при движении ВЭП в адиабатически нарастающем магнитном поле, которое используется для накачки поперечной скорости электронов в ЭОС гиротронов.

В работе [17] сравниваются скоростные распределения электронов в модели плоского диода без магнитного поля с двумя типами катодов: первый характеризуется шероховатой поверхностью, на которой регулярно расположены полусферы радиусом  $r_0$ , а второй – гладкой поверхностью.

Для катода первого типа распределение электронов  $f(v_x)$  ( $x$  – координата вдоль его поверхности) практически не меняется при увеличении расстояния  $z$  от катода, если оно превышает значение, равное примерно  $2r_0$ . Показано, что спектры начальных скоростей для катода с шероховатой поверхностью удовлетворительно согласуются с соответствующими спектрами для гладкого катода, если для него задать максвелловское распределение скоростей эмитируемых частиц, а именно

$$f(v)dv = 4\pi v^2 \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right) dv, \quad (3)$$

с температурой  $T^*$ , заметно превышающей реальную температуру катода  $T_c$ , и установить диапазон азимутальных углов  $\Delta\theta$  между нормалью к поверхности катода и направлением вектора начальной скорости, равным  $\pm 90^\circ$ . На рис. 1 показаны зависимости разброса начальных скоростей  $\Delta v_x$  от эффективной температуры  $T^*$  для модели с гладким катодом и от радиуса  $r_0$  для модели с шероховатым катодом. Здесь и далее скоростной разброс электронов определяется как среднее квадратичное (rms) отклонение от средней скорости.

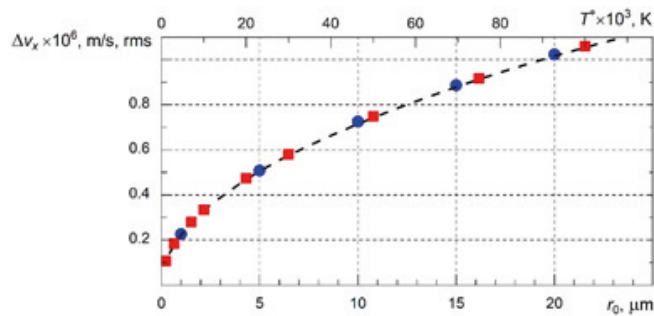


Рис. 1. Зависимости разброса скоростей электронов, эмитируемых с катода, от радиуса  $r_0$  в модели с шероховатым катодом ( $-\bullet-$ ) и от эффективной температуры  $T^*$  в модели с гладким катодом ( $-\blacksquare-$ ) при напряженности макроскопического поля в зазоре катод-анод, равной 30 кВ/см

Значения  $\Delta v_x$  для модели с шероховатым катодом были получены после усреднения спектров начальных скоростей, рассчитанных для различных расстояний между полусферами при заданном радиусе  $r_0$ . Если положить, что  $r_0 = 10$  мкм соответствует  $T^* = 46 \cdot 10^3$  К, то зависимости  $\Delta v_x(r_0)$  и  $\Delta v_x(T^*)$  практически совпадают (см. рис. 1).

Важно отметить, что в аксиально-симметричной ЭОС гиротрона катод имеет форму конуса и вблизи него имеется магнитное поле [4]. Как было отмечено выше, изменение скорости  $v_x$  происходит на малом расстоянии от катода, не превышающем нескольких радиусов  $r_0$ . На таком расстоянии движение электронов практически не отличается от движения в плоском диоде. Кроме того, влияние магнитного поля на это движение незначительно [4]. Следовательно, рассчитанный разброс скорости  $\Delta v_x$  можно рассматривать как разброс начальной поперечной скорости  $\Delta v_{\perp c}$ . Поскольку при типичных значениях  $r_0$  температура  $T^* \gg T_c$ , разброс начальных скоростей  $\Delta v_x$ , рассчитанный по температуре  $T^*$ , можно считать обусловленным суммарным действием шероховатости поверхности катода и разброса тепловых скоростей.

Предложенный в работе [17] подход к учету шероховатости катода, основанный на использовании модели ЭОС с гладким катодом и задании распределения начальных скоростей (3) с указанными значениями параметров  $T^*$  и  $\Delta\theta$ , был использован и в настоящей работе для выполнения траекторного анализа работы гиротрона СПбПУ [13 – 16]. Основные параметры этого гиротрона представлены в табл. 1. Изображение области пушки этого гиротрона показано ниже на рис. 3 и 4. Если выбрать величину скоростного разброса  $\Delta v_{\perp c} = 7,25 \cdot 10^5$  м/с, что соответствует  $r_0 = 10$  мкм (см. рис. 1), то, согласно выражениям (1) и (2), при указанных в табл. 1 значениях  $U_0$ ,  $B_c$ ,  $D_{ca}$ ,  $\psi_c$ ,  $\phi_c$  разброс начальных поперечных скоростей на катоде  $\delta v_{\perp c}$ , обусловленный его шероховатостью, будет равен 3,63 %.

Таблица 1

#### Основные геометрические параметры и характеристики расчетного рабочего режима гиротрона СПбПУ

Параметр	Значение
Ускоряющее напряжение $U_0$ , кВ	30
Ток пучка $I_b$ , А	10
Индукция магнитного поля в области резонатора $B_0$ , Тл	2,75
Индукция магнитного поля у катода $B_c$ , Тл	0,152
Рабочая мода	TE <sub>12,3</sub>
Средний радиус эмитирующего пояска катода $R_c$ , мм	35
Расстояние между катодом и анодом $D_{ca}$ , мм	10,4
Угол наклона образующей конусного эмитирующего пояска к оси прибора $\psi_c$ , град	35
Угол наклона магнитной силовой линии к поверхности катода $\phi_c$ , град	19,2

В расчетах использовались две версии магнетронно-инжекторной пушки [18]. В стандартной конфигурации пушки угол наклона образующей конусной части катода, равный  $35^\circ$ , был одинаковым вдоль всей образующей. Для такой пушки при рабочих параметрах, указанных в табл. 1, реализуется режим работы гиротрона со средним питч-фактором, равным примерно 1,3. Значения питч-фактора  $\alpha$  и скоростного разброса  $\delta v_\perp$ , обсуждаемые в настоящей работе, были определены в центральной плоскости резонатора в максимуме распределения магнитного поля вдоль продольной координаты. В модифицированной версии пушки был установлен управляющий электрод с увеличенным до  $50^\circ$  углом наклона конусной части. Как показали исследования, представленные в статье [19], регулированием напряжения между катодом и управляющим электродом  $U_{cont}$  можно добиться оптимизации распределения электрического поля в прикатодной области МИП и, как следствие, снижения скоростного разброса в пучке. Это позволяет увеличить рабочий питч-фактор и КПД гиротрона [20].

Для проведения траекторного анализа была использована модель ЭОС гиротрона СПбПУ, подробно описанная в статье [18]. Число центров эмиссии было увеличено до значения примерно  $3 \cdot 10^4$ , что позволило получить более гладкие распределения электронов по скоростям при повышенной температуре катода. Для расчета траекторий использовался вычислитель Tracking Solver. Зависимости среднего питч-фактора  $\alpha$  и скоростного разброса  $\delta v_\perp$  от эффективной температуры  $T^*$  для двух версий МИП показаны на рис. 2. С ростом температуры  $T^*$  наблюдается увеличение  $\delta v_\perp$ . При  $T^* \approx 0$  скоростной разброс обусловлен разностью величин внешних электрического и магнитного полей, а также собственного поля пространственного заряда ВЭП для электронов, стартующих с разных точек эмиттера. Этот позиционный разброс меньше для модифицированной МИП при оптимальном значении  $U_{cont} = -9$  кВ, по сравнению со стандартной МИП. Тогда вполне объяснимо, что введение дополнительного разброса начальных скоростей приводит к более заметному увеличению суммарного скоростного разброса для гиротрона с модифицированной МИП.

Экспериментальные данные, полученные ранее на гиротроне СПбПУ со стандартной МИП [21], дают основание утверждать, что для катода с однородной эмиссией разброс скоростей  $\delta v_\perp$  равен примерно 8,8 %. Такое значение разброса было, в частности, зафиксировано в экспериментах с катодом из гексаборида лантана  $LaB_6$ , в активном веществе которого типичный размер частиц равен около 10 мкм. В процессе эксплуатации такого катода активное вещество может уходить с поверхности эмиттера. При этом частично обнажается губка, размер зерен которой может быть заметно больше размера частиц в порошке гексаборида лантана. Следует также учесть довольно большую площадь эмитирующей поверхности, составляющую около 10 см<sup>2</sup>. Эта поверхность может быть неоднородной, что связано с неоднородностью нагрева и неоднородностью потоков частиц, бомбардирующих поверхность катода. Если учитывать указанные факторы, то можно предположить, что размер шероховатостей на катоде во время измерений, который определяет величину разброса начальных скоростей  $\delta v_{\perp c}$ , отличается от размера частиц в активном веществе эмиттера. На рис. 2 видно, что для стандартной МИП разброс  $\delta v_\perp = 8,8\%$  достигается при  $T^* \approx 67 \cdot 10^3$  К.

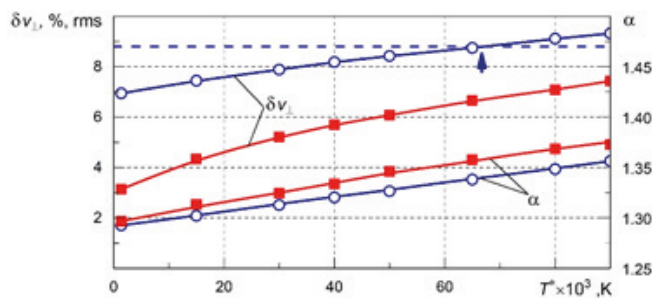


Рис. 2. Зависимости разброса поперечных скоростей  $\delta v_\perp$  и среднего питч-фактора  $\alpha$  от эффективной температуры  $T^*$  для стандартной (—○—) и модифицированной (—■—) магнетронно-инжекторных пушек;  $U_{cont} = -9$  кВ



Следовательно, используя приведенные на рис. 1 зависимости, можно сделать вывод, что катод из гексаборида лантана, в экспериментах с которым был зафиксирован скоростной разброс 8,8 %, характеризовался усредненной шероховатостью с радиусом  $r_0 \approx 14$  мкм.

### Моделирование тепловых эффектов, связанных с нагревом катода

Модель гиротрона СПБПУ, которая использовалась при расчете температурного распределения, показана на рис. 3. Катодный узел 1 прибора имеет разборную конструкцию, что позволяет, в частности, оперативно заменять деталь 2 с эмитирующим пояском. Нагрев катода осуществляется с помощью вольфрамовой спирали-подогревателя 3. Ток накала  $I_h$  подогревателя протекает по центральному катодному стержню 4. Тепловые экраны и специальные зазоры между деталями обеспечивают термоизоляцию нагревательной спирали и эмитирующего пояска от остальных элементов катодного блока. В гиротроне СПБПУ на разных этапах исследования было использовано более десяти эмиттеров двух типов: металлопористые вольфрам-бариевые (рабочая температура  $T_c \approx 1100$  °С) и гексаборид лантановые ( $T_c \approx 1600$  °С) [22].

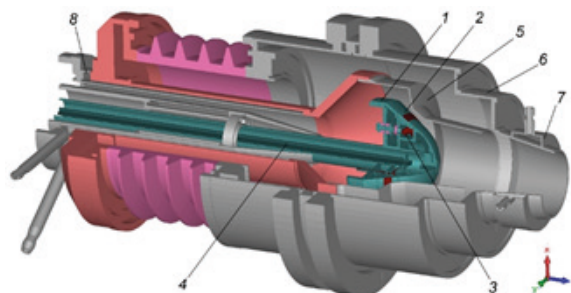


Рис. 3. Трехмерное изображение области пушки гиротрона СПБПУ:

1 – катодный блок; 2 – деталь с эмитирующим пояском; 3 – спираль; 4 – центральный стержень;  
5 – анод; 6 – корпус; 7, 8 – водяные полости

Задача по определению деформации элементов МИП, вызванной нагревом термокатада, решалась в три этапа. На первом рассчитывалась плотность тока в цепи нагревателя с помощью вычислителя Stationary Current Solver с учетом проводящих свойств материалов и геометрии элементов катодного блока. На основании полученных данных было рассчитано количество тепла, выделяемое при омическом нагреве деталей-проводников при протекании через них тока  $I_h$ .

На втором этапе было рассчитано стационарное распределение температуры с помощью вычислителя Thermal Static Solver. Кроме омического нагрева, рассмотренного на первом этапе, было принято во внимание излучение нагретых тел, являющихся вторичными источниками тепла в вакуумной системе. Определялись тепловые потери нагретых тел, которые считали дополнительными источниками теплоты (Heat Source) для тел, поглощающих тепловое излучение. Распределение температуры в катодной области гиротрона при токе  $I_h = 30$  А, соответствующем нагреву катода из гексаборида лантана, показано на рис. 4. Очевидно, что наиболее нагретыми должны быть элементы катодного узла. Тепловая деформация, связанная с их нагревом, может приводить к изменению геометрии МИП и, как следствие, к изменению параметров формируемого электронного потока.

На третьем этапе для расчета тепловой деформации использовался вычислитель Linear Structural Mechanics Solver, с помощью которого можно определять параметры, характеризующие линейное и объемное расширение твердых тел. Катодная ножка, на которой закреплен катодный блок, в торцевой области гиротрона соединена через изолятор с его корпусом (см. рис. 3). Поэтому линейное расширение элементов катодного блока в продольном направлении приводит к его смещению в сторону резонатора. Объемное расширение сопровождается увеличением среднего радиуса эмитирующего пояска. Значения соответствующих параметров  $\Delta z$  и  $\Delta r$ , которые были рассчитаны при токах накала  $I_h$ , необходимых для нагрева катодов LaB<sub>6</sub> и W-Ba, приведены в табл. 2.

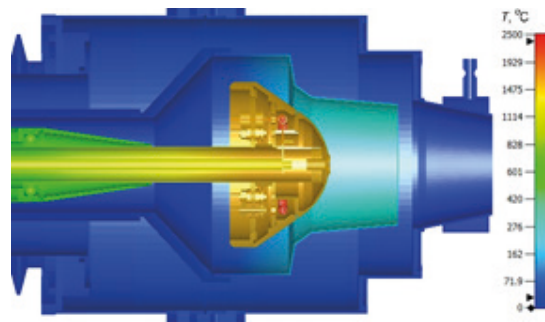


Рис. 4. Смоделированное распределение температуры по элементам гиротрона с катодом из гексаборида лантана

Таблица 2

**Деформация элементов МИП для двух типов термокатода**

Рабочие характеристики МИП			Изменение геометрии МИП	
Материал катода	$I_h$	$T_c$	$\Delta z$	$\Delta r$
	А	°С	мм	
LaB <sub>6</sub>	30	1616	1,41	0,29
W-Ba	25	1100	0,98	0,21

Обозначения:  $I_h$  – ток накала,  $T_c$  – температура катода,  $\Delta z$  – продольное смещение катодного блока,  $\Delta r$  – радиальное расширение эмитирующего пояса, МИП – магнетронно-инжекторная пушка.

Расчет траекторий электронов в зависимости от значений параметров  $\Delta z$  и  $\Delta r$  был выполнен для модифицированной МИП гиротрона, поскольку ее геометрия была оптимизирована для получения минимального скоростного разброса. Вначале температура катода задавалась равной  $T_c$ , принимался во внимание только разброс начальных тепловых скоростей электронов без учета шероховатости катода. Зависимости среднего питч-фактора  $\alpha$  и скоростного разброса  $\delta v_{\perp}$  от параметров  $\Delta z$  и  $\Delta r$  показаны на рис. 5. При варьировании  $\Delta r$  учитывалось только изменение размеров детали катодного блока с эмитирующим пояском (см. рис. 3).

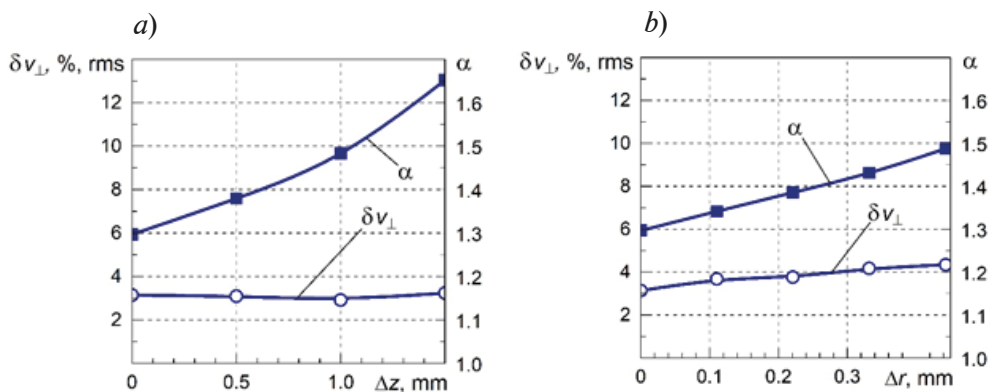


Рис. 5. Зависимости разброса поперечных скоростей  $\delta v_{\perp}$  и среднего питч-фактора  $\alpha$  от продольного смещения катода  $\Delta z$  (a) и от радиального расширения эмитирующего пояса  $\Delta r$  (b) для модифицированной МИП;  $U_{cont} = -9$  кВ



Удлинение катодной ножки приводит к сокращению расстояния между катодом и анодом и, следовательно, к увеличению амплитуды электрического поля в этой области. В результате возрастает начальная поперечная скорость на катоде и средний питч-фактор. Распределение электрического поля (форма эквипотенциалей) при варьировании величины  $\Delta z$  остается практически неизменной. Поскольку в основном от этого распределения зависит величина скоростного разброса, то и она меняется незначительно при изменении  $\Delta z$ . Повышение  $\alpha$  с ростом  $\Delta r$  также можно объяснить сокращением расстояния катод-анод. Радиальное расширение детали с эмитирующим пояском сопровождается некоторым изменением распределения электрического поля. Поскольку в исходном состоянии ( $\Delta r = 0$ ) это распределение было оптимизировано для получения минимального скоростного разброса, любое изменение этого распределения сопровождается увеличением значения  $\delta v_{\perp}$  (рис. 5, *b*).

В заключение исследования был выполнен траекторный анализ в гиротроне СПБПУ с модифицированной МИП как с учетом шероховатости катода, так и с учетом тепловых эффектов, вызванных его нагревом. Рассматривали температурный режим, соответствующий использованию катода, изготовленного из гексаборида лантана. При  $\Delta z = 1,41$  мм,  $\Delta r = 0,29$  мм,  $T^* = 67 \cdot 10^3$  К и  $\Delta\theta = \pm 90^\circ$  были получены следующие значения среднего питч-фактора и скоростного разброса:  $\alpha = 2,25$  и  $\delta v_{\perp} = 5,89\%$ . Заметное увеличение питч-фактора, по сравнению с исходным значением  $\alpha \approx 1,3$  (см. рис. 2), произошло в результате одновременного удлинения катодной ножки и расширения эмитирующего пояса. При больших значениях  $\alpha$  и  $\delta v_{\perp}$  часть электронов с большими поперечными скоростями отражается от магнитной пробки в области перед входом в резонатор (см., например, статьи [18, 21]). Отраженные частицы могут накапливаться в ловушке между катодом и магнитной пробкой, что сопровождается возбуждением паразитных низкочастотных колебаний (НЧК), негативно влияющих на качество формируемого ВЭП. В описанном выше режиме, от магнитной пробки отражалось 364 частицы из 30 120 частиц, стартующих с катода. Это соответствует коэффициенту отражения  $K_{refl} = 1,2 \cdot 10^{-2}$ . При таком коэффициенте отражения могут возбуждаться паразитные НЧК с заметной амплитудой [21].

Добиться снижения величин  $\alpha$  и  $K_{refl}$  можно за счет увеличения индукции магнитного поля  $B_c$  у катода и, соответственно, уменьшения коэффициента магнитной компрессии  $B_0/B_c$ . При этом значения основных параметров  $U_0$ ,  $B_0$  и  $I_b$ , от которых в первую очередь зависит генерируемая мощность и частота излучения, остаются неизменными. В гиротроне СПБПУ для увеличения магнитного поля у катода следует увеличивать число витков катодной катушки [22]. Описанные выше результаты для модифицированной МИП были получены при  $B_0/B_c = 19,20$ , что соответствует 22 виткам катодной катушки. Переход к 24 виткам сопровождается уменьшением значения  $B_0/B_c$  до 18,02. Рассчитанные при таком  $B_0/B_c$  значения питч-фактора и скоростного разброса составили  $\alpha = 1,44$  и  $\delta v_{\perp} = 6,59\%$ . Эти значения характеризуют качество ВЭП как высокое, при котором отсутствует отражение электронов от магнитной пробки и может быть обеспечена повышенная эффективность работы гиротрона с большим значением электронного КПД [20].

### Заключение

Новая методика, предложенная в данной работе, может быть использована для учета разброса начальных скоростей электронов, вызванного шероховатостью поверхности катода, при выполнении трехмерного моделирования траекторий электронов в электронно-оптической системе гиротрона. Определено влияние шероховатости катода на скоростной разброс и средний питч-фактор электронов в ЭОС гиротрона средней мощности 4-миллиметрового диапазона длин волн. Сопоставление данных, полученных в эксперименте, с результатами траекторного анализа позволило определить усредненный размер неоднородностей на поверхности катода, который использовался в этом гиротроне.

Были получены данные, характеризующие нагрев различных элементов ЭОС при рабочих температурах термокатодов, используемых в гиротроне. Определено влияние удлинения катодной ножки и радиального расширения эмитирующего пояса на параметры ВЭП. Показана возможность реализации режима работы гиротрона с высоким качеством ВЭП с учетом влияния на его параметры шероховатости катода и тепловых эффектов в электронной пушке.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., Tai E. M., Azizov E. A., Ilin V. I. Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2011. Vol. 32. No. 3. Pp. 337–342.
2. Thumm M. State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers // *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*. 2020. Vol. 41. No. 1. Pp. 1–140.
3. Nusinovich G. S. Introduction to physics of gyrotrons. Baltimore, USA: Johns Hopkins University Press, 2004. 335 p.
4. Цимринг Ш. Е. Введение в высокочастотную вакуумную электронику и физику электронных пучков. Пер. с англ. Нижний Новгород: Ин-т прикладной физики РАН, 2012. 575 с.
5. Цимринг Ш. Е. О разбросе скоростей в винтовых электронных пучках // *Известия вузов. Радиофизика*. 1972. Т. 15. № 8. С. 1247–1259.
6. Авдошин Е. Г., Николаев Л. В., Платонов И. М., Цимринг Ш. Е. Экспериментальное исследование скоростного разброса в винтовых электронных пучках // *Известия вузов. Радиофизика*. 1973. Т. 16. № 4. С. 605–612.
7. Lau Y. Y. Effects of cathode surface roughness on the quality of electron beams // *Journal of Applied Physics*. 1987. Vol. 61. No. 1. Pp. 36–44.
8. Lygin V. K. Numerical simulation of intense helical electron beams with the calculation of the velocity distribution functions // *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*. 1995. Vol. 16. No. 2. Pp. 363–376.
9. Запевалов В. Е., Корнишин С. Ю., Котов А. В., Куфтин А. Н., Малыгин О. В., Мануилов В. Н., Седов А. С., Цалолихин В. И. Система формирования электронного пучка для гиротрона с частотой 258 ГГц, предназначенного для экспериментов по динамической поляризации ядер // *Известия вузов. Радиофизика*. 2010. Т. 53. № 4. С. Р. 251–259.
10. Лещева К. А., Мануилов В. Н. Численное 3D-моделирование систем формирования винтовых электронных пучков гироприборов с азимутально неоднородным распределением тока эмиссии // *Успехи прикладной физики*. 2019. Т. 7. № 3. С. 298–308.
11. Zhang J., Ily S., Pagonakis I., Avramidis K., Thumm M., Jelonnek J. Influence of emitter surface roughness on high power fusion gyrotron operation // *Nuclear Fusion*. 2016. Vol. 56. No. 2. P. 026002.
12. CST Studio Suite. Режим доступа: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/> (Дата обращения: 17.06.2022).
13. Касьяненко Д. В., Лукша О. И., Пиосчик Б., Соминский Г. Г., Тумм М. Низкочастотные паразитные колебания пространственного заряда в винтовом электронном пучке гиротрона // *Известия вузов. Радиофизика*. 2004. Т. 47. № 5–6. С. 463–470.
14. Лукша О. И., Пиосчик Б., Соминский Г. Г., Тумм М., Самсонов Д. Б. Подавление паразитных колебаний пространственного заряда в гиротроне // *Известия вузов. Радиофизика*. 2006. Т. 49. № 10. С. 880–886.
15. Лукша О. И. Моделирование низкочастотных коллективных процессов в электронных потоках гиротронов // *Известия вузов. Радиофизика*. 2009. Т. 52. № 5–6. С. 425–437.
16. Louksha O. I., Sominski G. G., Arkhipov A. V., Dvoretzkaya N. V., Kolmakova N. G., Samsonov D. V., Trofimov P. A. Gyrotron research at SPbPU: Diagnostics and quality improvement of electron beam // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2016. Vol. 44. No. 8. Pp. 1310–1319.
17. Лукша О. И., Трофимов П. А., Малкин А. Г. Влияние шероховатости поверхности катода на характеристики электронного потока в электронно-оптической системе гиротрона // XI Всероссийская научно-техническая конференция «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 31 мая – 3 июня 2022 г., г. Санкт-Петербург, Россия. Сборник докладов. СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2022. С. 456–460.
18. Лукша О. И., Трофимов П. А. Моделирование неоднородных электронных потоков в электронно-оптической системе гиротрона // *ЖТФ*. 2018. Т. 88. № 4. С. 614–620.
19. Лукша О. И., Самсонов Д. Б., Соминский Г. Г., Цапов А. А. Повышение качества винтового электронного потока и КПД гиротрона при регулировании распределения электрического поля в области магнетронно-инжекторной пушки // *ЖТФ*. 2012. Т. 82. № 6. С. 101–105.
20. Лукша О. И., Трофимов П. А. Высокоэффективный гиротрон с многоступенчатой рекуперацией остаточной энергии электронов // *ЖТФ*. 2019. Т. 89. № 12. С. 1988–1996.



21. Лукша О. И., Самсонов Д. Б., Соминский Г. Г., Семин С. В. Динамические процессы в винтовых электронных потоках гиротронов // ЖТФ. 2013. Т. 83. № 5. С. 132–140.

22. Лукша О. И. Винтовые электронные потоки гиротронов: динамика пространственного заряда и методы повышения качества. Дисс. ... докт. физ.-мат. наук. 01.04.04. Защ. 01 декабря 2011 г.: утв. 01.12.2011. СПб.: СПбГПУ, 2011. 285 с.

## REFERENCES

1. Litvak A. G., Denisov G. G., Myasnikov V. E., et al., Development in Russia of megawatt power gyrotrons for fusion, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 32 (3) (2011) 337–342.

2. Thumm M., State-of-the-art of high-power gyro-devices and free electron masers, *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*. 41 (1) (2020) 1–140.

3. Nusinovich G. S., Introduction to physics of gyrotrons, Johns Hopkins University Press, Baltimore, USA, 2004.

4. Tsimring Sh. E., Electron beams and microwave vacuum electronics, John Wiley & Sons, Hoboken, 2007.

5. Tsimring Sh. E., On the spread of velocities in helical electron beams, *Radiophys. Quant. El.* 15 (8) (1972) 952–961.

6. Avdoshin E. G., Nikolaev L. V., Platonov I. N., Tsimring Sh. E., Experimental investigation of the velocity spread in helical electron beams, *Radiophys. Quant. El.* 16 (4) (1973) 461–466.

7. Lau Y. Y., Effects of cathode surface roughness on the quality of electron beams, *J. Appl. Phys.* 61 (1) (1987) 36–44.

8. Lygin V. K., Numerical simulation of intense helical electron beams with the calculation of the velocity distribution functions, *Int. J. Infrared Millim. Waves*. 16 (2) (1995) 363–376.

9. Zapevalov V. E., Kornishin S. Yu., Kotov A. V., et al., System for the formation of an electron beam in a 258 GHz gyrotron designed for experiments on dynamic polarization of nuclei, *Radiophys. Quant. El.* 53 (4) (2010) 229–236.

10. Leshcheva K. A., Manuilov V. N., Numerical simulation of 3-D systems of formation of helical electron beams of gyro-devices with azimuthally inhomogeneous distribution of emission current, *Advances in Applied Physics*. 7 (3) (2019) 298–308 (in Russian).

11. Zhang J., Illy S., Pagonakis I., et al., Influence of emitter surface roughness on high power fusion gyrotron operation, *Nucl. Fusion*. 56 (2) (2016) 026002.

12. CST Studio Suite, URL: <https://www.3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/>. Accessed July 06, 2022.

13. Kas'yanenko D. V., Louksha O. I., Sominsky G. G., et al., Low-frequency parasitic space-charge oscillations in the helical electron beam of a gyrotron, *Radiophys. Quant. El.* 47 (5–6) (2004) 414–420.

14. Louksha O. I., Piosczyk B., Sominski G. G., et al., Suppression of parasitic space-charge oscillations in a gyrotron, *Radiophys. Quant. El.* 49 (10) (2006) 793–798.

15. Louksha O. I., Simulation of low-frequency collective processes in gyrotron electron beams, *Radiophys. Quant. El.* 52 (5–6) (2009) 386–397.

16. Louksha O. I., Sominski G. G., Arkhipov A. V., et al., Gyrotron research at SPbPU: Diagnostics and quality improvement of electron beam, *IEEE Trans. Plasma Sci.* 44 (8) (2016) 1310–1319.

17. Louksha O. I., Trofimov P. A., Malkin A. G., Vliyaniye sherokhovatosti poverkhnosti katoda na kharakteristiki elektronnoy potoka v elektronno-opticheskoy sisteme girotrona [Effect of cathode surface roughness on the characteristics of the electron beam in the electron optical system of a gyrotron], In book: XI Vserossiyskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Elektronika i mikroelektronika SVCH". Sbornik dokladov [Transactions of XI All-Russian Scientific and Technical Conference "Electronics and Microelectronics of Microwaves", May 31 – June 3, 2022, St. Petersburg, Russia. The collection of reports, ETU "LETI", St. Petersburg (2022) 456–460 (in Russian).

18. Louksha O. I., Trofimov P. A., Simulation of non-uniform electron beams in the gyrotron electron-optical system, *Tech. Phys.* 63 (4) (2018) 598–604.

19. Louksha O. I., Samsonov D. B., Sominskii G. G., Tsapov A. A., Improvement of the helical electron beam quality and the gyrotron efficiency by controlling the electric field distribution near a magnetron injection gun, *Tech. Phys.* 57 (6) (2012) 835–839.

20. Louksha O. I., Trofimov P. A., Highly efficient gyrotron with multi-stage recuperation of residual electron energy, *Tech. Phys.* 64 (12) (2019) 1889–1897.

21. Louksha O. I., Samsonov D. B., Sominskii G. G., Semin S. V., Dynamic processes in helical electron beams in gyrotrons, *Tech. Phys.* 58 (5) (2013) 751–759.

22. Louksha O. I., Vintovye elektronnye potoki girotronov: dinamika prostranstvennogo zaryada i metody povysheniya kachestva [Gyrotron helical electron beams: Space charge dynamics and methods for quality improvement], Thesis for a Doctor's degree (phys.-math. sci.), St. Petersburg, SPbPU, 2011.

### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**ЛУКША Олег Игоревич** — доктор физико-математических наук, профессор Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
louksha@rphf.spbstu.ru  
ORCID: 0000-0002-6402-8112

**ТРОФИМОВ Павел Анатольевич** — кандидат физико-математических наук, инженер Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
trofpa@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-3585-1169

**МАЛКИН Александр Геннадьевич** — студент Высшей инженерно-физической школы Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия.

195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29  
alexmalkin47@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-4047-3956

### THE AUTHORS

**LOUKSHA Oleg I.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
louksha@rphf.spbstu.ru  
ORCID: 0000-0002-6402-8112

**TROFIMOV Pavel A.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
trofpa@yandex.ru  
ORCID: 0000-0002-3585-1169

**MALKIN Alexander G.**

*Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University*  
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia  
alexmalkin47@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-4047-3956

*Статья поступила в редакцию 31.05.2022. Одобрена после рецензирования 06.07.2022. Принята 06.07.2022.*

*Received 31.05.2022. Approved after reviewing 06.07.2022. Accepted 06.07.2022.*